



Impact du débit d'absorption spécifique sur les effets thermiques d'une personne exposée à une onde plane en bandes HF et VHF

Jeanne Frère, Alain Alcaras, Christophe Lemoine, Gwenaël Le Cadre, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau

► To cite this version:

Jeanne Frère, Alain Alcaras, Christophe Lemoine, Gwenaël Le Cadre, Maxim Zhadobov, et al.. Impact du débit d'absorption spécifique sur les effets thermiques d'une personne exposée à une onde plane en bandes HF et VHF . 18ème colloque international et exposition sur la compatibilité électromagnétique (CEM 2016), Jul 2016, Rennes, France. hal-01345491

HAL Id: hal-01345491

<https://hal.science/hal-01345491>

Submitted on 13 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACT DU DEBIT D'ABSORPTION SPECIFIQUE SUR LES EFFETS THERMIQUES D'UNE PERSONNE EXPOSEE A UNE ONDE PLANE EN BANDES HF ET VHF

J. Frère^{1,2}, M. Zhadobov¹, R. Sauleau¹, C. Lemoine¹, A. Alcaras², G. Le Cadre²

¹Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (IETR), UMR CNRS 6164, Université Rennes 1, 263 avenue du Général Leclerc, 35042 Rennes

²Thales Communications & Sécurité, 110 avenue du Maréchal Leclerc, BP 70945, 49309 Cholet Cedex
jeanne.frere@univ-rennes1.fr

Résumé. La présence de nombreux systèmes radio a entraîné la publication de normes internationales permettant d'évaluer le risque de surexposition des personnes. Cependant il n'existe pas de moyens de mesures de champs *in vivo* ; les niveaux d'exposition sont donc vérifiés grâce à des simulations numériques. Pour cela nous comparons différents fantômes hétérogènes et homogènes de morphologie équivalente à l'être humain utilisés en simulation électromagnétique. En HF et VHF, l'un des effets reconnus étant l'échauffement des tissus, nous étudions les effets thermiques induits par une exposition électromagnétique sur un fantôme hétérogène. Les résultats montrent que la modélisation des tissus en surface des fantômes peut induire une forte variation des valeurs de débit d'absorption spécifique (DAS) local. Ils montrent également que la répartition de la température est moins dépendante de la fréquence d'exposition que la répartition en DAS. Enfin, nous proposons une caractérisation de la température du corps entier par la température moyenne du sang.

I. INTRODUCTION

Afin de limiter la surexposition électromagnétique des personnes due au nombre croissant de systèmes radioélectriques, des normes internationales ont été publiées par l'ICNIRP et l'IEEE [1] [2].

L'évaluation expérimentale des niveaux d'exposition dans le corps n'étant pas mesurable en HF et VHF, des simulations numériques sont nécessaires pour calculer les champs électriques, les densités de courant et les débits d'absorption spécifiques (DAS) induits dans le corps. Ces simulations sont effectuées grâce à des fantômes homogènes ou hétérogènes de morphologies équivalentes à l'être humain.

Nous étudions ici plusieurs fantômes de morphologies différentes et constitués de plusieurs tissus (fantôme hétérogène) ou d'un seul tissu (fantôme homogène). Les normes définissant des limites en champs pour des expositions en onde plane, les fantômes seront exposés à une onde plane polarisée verticalement entre 1 et 90 MHz.

De plus, l'effet « connu et expliqué » des expositions aux ondes radiofréquences (RF) sur les personnes étant

l'échauffement des tissus, nous étudions également l'évolution thermique d'un fantôme hétérogène exposé à une onde plane polarisée verticalement. Cette étude permet d'étudier l'influence de la température ambiante sur les élévations de température induites dans le corps par l'exposition électromagnétique. De plus, la répartition des élévations de température est disectée en fonction de la fréquence ainsi que la caractérisation de la température du corps entier.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Fantômes utilisés

Les fantômes étudiés sont issus de la Virtual Family [3] : Duke (1,74 m ; 70 kg ; jusqu'à 84 tissus), Ella (1,6 m ; 58 kg ; jusqu'à 84 tissus), et du Visible Human Project [4] Hugo (1,87 m ; 113 kg ; 32 tissus). Nous utilisons une résolution de 4 mm pour Hugo et de 5 mm pour Ella/Duke. Pour l'étude thermique, seul Duke est utilisé. Les tissus des fantômes hétérogènes ont les propriétés diélectriques des tissus décrites par Gabriel *et al.* [5] et les propriétés thermiques données par IT'IS Foundation [6].

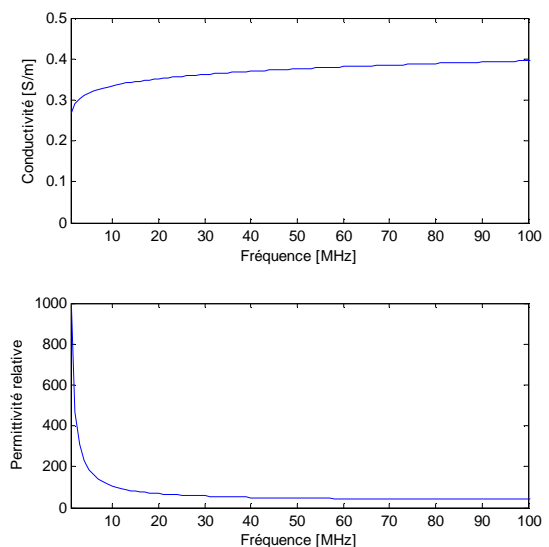


Figure 1 : Propriétés diélectriques du liquide équivalent entre 2 et 100 MHz

Ces fantômes sont homogénéisés par un même tissu équivalent dont les propriétés diélectriques sont données

en Figure 1. Ces propriétés ont été déduites de la moyenne des conductivités et permittivités des neuf tissus les plus présents dans le fantôme Hugo de résolution 1 mm.

Pour l'étude des fantômes, la couche de tissus en surface de Duke et Hugo sera modifiée afin d'expliquer l'influence de la composition de la 1^{ère} couche de tissus des fantômes sur les valeurs locales de DAS. Dans le premier cas, la surface sera composée uniquement de peau ; dans le second cas uniquement de graisse et dans le troisième cas, à la fois de graisse et de peau. Pour ce troisième cas, ne pouvant pas modifier l'identification des voxels des fantômes, Hugo aura une surface ayant comme propriété diélectrique la moyenne de celle de la peau et de la graisse alors que Duke aura une surface dont les voxels seront soit de la graisse, soit de la peau.

II.2. Etude électromagnétique

Pour l'étude électromagnétique les fantômes sont exposés de face en espace libre à une onde plane polarisée verticalement de 19,4 V/m (1 W/m²) pour des fréquences entre 30 et 90 MHz. Le logiciel utilisé pour les calculs est CST Microwave (méthode numérique Finite Integration Technique FIT). Les fantômes étudiés sont hétérogènes et homogènes.

II.3. Etude thermique

Pour l'étude thermique, Duke est exposé de face en espace libre à une onde plane polarisée verticalement à 61 V/m (~10 W/m² ; limite ICNIRP) entre 30 et 90 MHz. Nous avons choisi d'utiliser une densité de puissance dix fois plus forte que dans l'étude électromagnétique afin que les variations de température soient significatives. Le fantôme est hétérogène. A t = 0 s, la température de tous les tissus est fixée à 37 °C et la température extérieure à 28 °C. L'exposition électromagnétique n'intervient qu'à t = 30 min afin que la simulation calcule la distribution en température initiale du corps correspondant à l'adaptation du corps à l'air ambiant. Nous utilisons les conditions aux limites de Fourier pour les interfaces tissu1/tissu2 et air/tissu. Le logiciel utilisé pour le calcul de la source électromagnétique et des élévations de température induites par cette exposition est Sim4Life. C'est la méthode FDTD qui est utilisée pour l'électromagnétisme et le modèle de Pennes pour le calcul thermique [7].

Nous rappelons les expressions locales de l'équation de bio-chaleur et du DAS :

$$C\rho \frac{\partial T(t)}{\partial t} = \text{div}(\overline{\text{grad}KT(t)}) + \rho \text{DAS} + A - B(T(t) - T_{\text{sang}}(t)) \quad (1)$$

$$\text{DAS} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (2)$$

Les termes présents dans (1) et (2) sont :

- C, capacité calorifique du tissu [J/kg/K],
- ρ, masse volumique du tissu [kg/m³],

- T, température du tissu du tissu [K],
- DAS, débit d'absorption spécifique dans le tissu représentant la puissance absorbée [W/kg],
- K, conductivité thermique du tissu représentant le transfert de chaleur par conduction interne [W/m/K],
- A, production de chaleur métabolique du tissu [W/m³],
- B, échange de chaleur via le flux sanguin [W/K/m³],
- T_{sang}, température du sang [K],
- σ, conductivité du tissu [S/m] et
- E, champ électrique dans le tissu [V/m].

Contrairement à d'autres études ([8]), la température du sang varie temporellement et spatialement.

III. RÉSULTATS

Nous comparons ici les valeurs de DAS corps entier (DAS_{CE}) et de DAS 10g maximales de six fantômes. Les fantômes sont Ella/Duke/Hugo hétérogènes et Ella/Duke/Hugo homogènes. Ces fantômes sont exposés de face à une onde plane polarisée verticalement à 1 W/m² en espace libre.

Puis nous étudions les effets thermiques sur un fantôme hétérogène exposé à une onde plane de face polarisée verticalement à 10 W/m² en espace libre.

III.1. Résultats électromagnétiques

Les valeurs de DAS_{CE} pour les six fantômes sont données en Figure 2 et celles en DAS 10g max en Figure 3. Les écarts entre un fantôme hétérogène et son analogue homogène sont compris entre -1 et 2,5 dB pour le DAS_{CE} des 3 fantômes. Pour le DAS 10g max, ils sont ≤ 5 dB pour Ella et Duke et ≤ 9 dB pour Hugo. De plus les valeurs de DAS 10g max du fantôme Hugo sont deux fois supérieures à celles de Duke et Ella. Comme cela a déjà été démontré dans la littérature, la fréquence de résonance du corps dépend de la taille des fantômes. Elle est en effet d'autant plus élevée que le fantôme est grand.

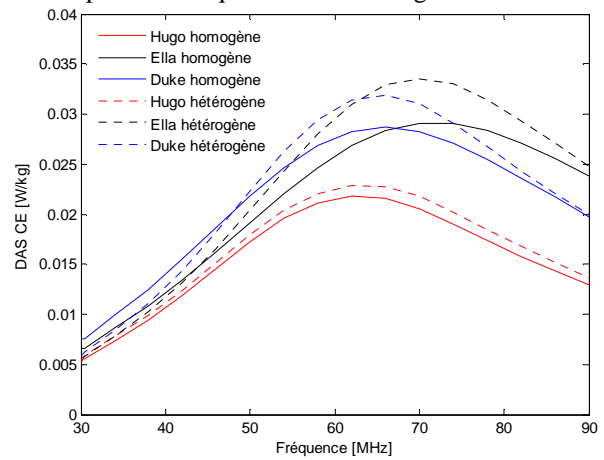


Figure 2 : DAS_{CE} en HF et VHF pour différents fantômes exposés à une onde plane à 1 W/m²

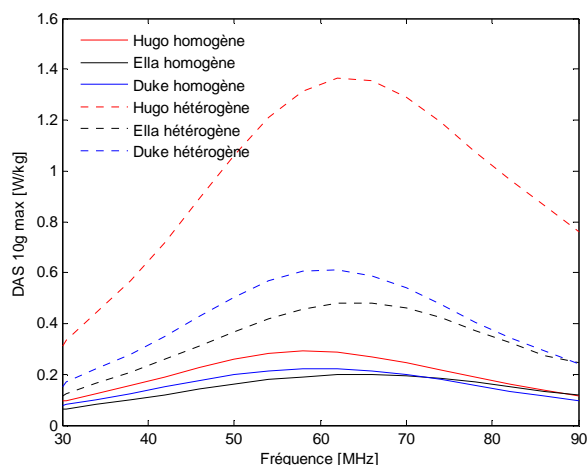


Figure 3 : DAS 10g max en HF et VHF pour différents fantômes exposés à une onde plane à 1 W/m^2

Outre l'indice de masse corporelle différent entre Ella/Duke (23 kg/m^2) et Hugo (32 kg/m^2), nous avons remarqué que Hugo ne possédait en surface quasiment que de la graisse, alors que Ella et Duke possèdent à la fois de la graisse et de la peau. Or des études ont montré l'influence de certains tissus sur les valeurs de DAS local, notamment entre des tissus à forte teneur en eau (comme la peau ou les muscles) et des tissus à faible teneur en eau (comme la graisse) [9]. D'ailleurs les tissus à forte teneur en eau ont une conductivité plus forte que les tissus pauvres en eau ($\sigma_{\text{graisse}} \sim 0,03 \text{ S/m}$ et $\sigma_{\text{peau}} \sim 0,4 \text{ S/m}$ en HF/VHF).

Nous avons donc étudié l'influence des tissus en surface des fantômes Duke et Hugo. Les tissus constituant la surface des fantômes ont été modifiés pour avoir quatre cas distincts :

- Surface composée uniquement de graisse
- Surface composée uniquement de peau
- Surface composée d'un mélange de graisse et de peau
- Surface composée du tissu équivalent correspondant aux fantômes homogènes

Le fantôme Ella a été mis de côté, car il présente les mêmes tissus en surface que Duke.

Les valeurs de DAS 10g max selon la composition des surfaces de Duke et Hugo sont présentées en Figure 4. La présence de peau en surface d'Hugo (à la place de la graisse) résulte en des DAS 10g max proches de ceux de Duke ayant de la peau en surface. Les écarts entre un fantôme Hugo n'ayant que de la peau en surface et Duke hétérogène (surface constituée de peau et de graisse) sont inférieurs à 1,4 dB contre 4 dB précédemment. Cela nous indique que les écarts de DAS local entre Hugo et Duke sont bien dus à la surface entièrement grasseuse d'Hugo. De plus les écarts sur les DAS 10g dus à l'homogénéisation entre Hugo homogène et Hugo (avec de la peau en surface) sont maintenant du même ordre de grandeur que les fantômes Ella/Duke. De même que les valeurs de DAS 10g sont plus élevées chez Duke pour

une surface composée uniquement de graisse que pour une surface possédant que de la peau. Cependant il est difficile de quantifier cette différence car les écarts sont variables entre Hugo et Duke.

En prenant comme référence le cas d'une surface composée à la fois de peau et de graisse, ce qui représente les cas les plus réalistes pour des résolutions de 5 mm (Duke hétérogène et Hugo hétérogène (graisse/peau)), nous constatons en onde plane que l'omniprésence de graisse en surface de Duke entraîne une légère diminution de DAS 10g ($< 1,5 \text{ dB}$), tandis que l'omniprésence de graisse sur la surface d'Hugo entraîne une augmentation importante de DAS 10g (4 dB à 5 dB). L'omniprésence de peau en surface de Duke entraîne une diminution de DAS 10g (1 à 3 dB) alors que pour Hugo, la diminution est inférieure à 1,5 dB. De plus l'homogénéisation des fantômes entraîne une baisse des valeurs de DAS 10g max $\leq 4 \text{ dB}$ pour Duke et $\leq 3 \text{ dB}$ pour Hugo.

Nous en concluons qu'une surface de fantôme composée uniquement de graisse peut engendrer une augmentation en DAS 10g, contrairement à une surface composée uniquement de peau qui engendre une diminution en DAS 10g.

De plus, notre liquide équivalent entraîne une diminution des valeurs de DAS local allant jusqu'à 5 dB.

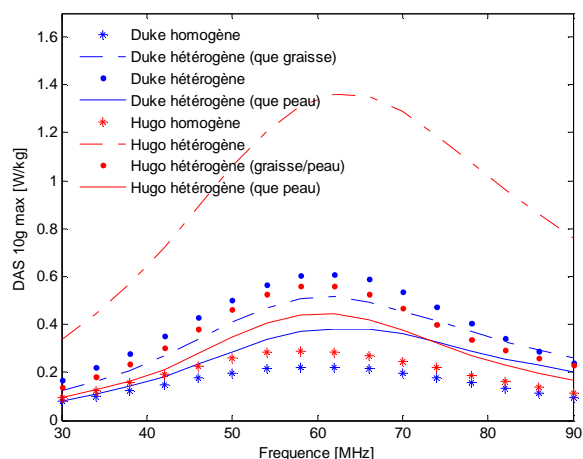


Figure 4 : Influence de la 1^{ère} couche de tissus chez Hugo et Duke en VHF sur le DAS 10g max – exposition onde plane à 1 W/m^2

III.2. Résultats thermiques

Suite aux études électromagnétiques, nous avons étudié les effets thermiques d'une exposition en onde plane à 61 V/m (10 W/m^2) polarisée verticalement sur le fantôme hétérogène Duke.

Comme le DAS 10g max est toujours situé à la surface du corps pour ce type d'exposition en HF et VHF, nous avons étudié l'évolution de la température à 60 MHz pour le point de DAS 10g max à différentes températures extérieures. Les quatre températures extérieures T_{ext} choisies sont 0, 20, 28 et 35 °C. L'élévation de température est de 0,84 °C pour $T_{\text{ext}} = 0$ °C, de 0,85 °C pour $T_{\text{ext}} = 20$ °C et de 0,86 °C pour $T_{\text{ext}} = 28$ et 35 °C.

Nous nous plaçons donc dans le pire cas pour la suite de l'étude thermique et choisissons $T_{\text{ext}} = 28^\circ\text{C}$ (considérée comme une condition thermoneutre dans la littérature [10]).

a - Elévations locales de température

Grâce au logiciel Sim4Life, les élévations de température en différentes parties du corps du fantôme ont été calculées ainsi que les DAS correspondants. Le DAS 10g max apparaissant sur la surface de la cheville, nous étudions les effets thermiques induits dans les chevilles au point de DAS 10g max et sur les deux chevilles.

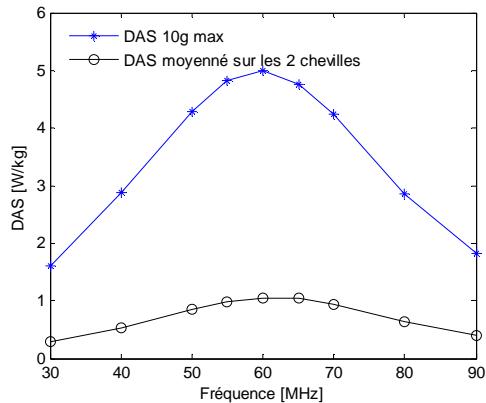


Figure 5 : DAS 10g max et DAS moyenné dans les chevilles pour Duke hétérogène - Exposition onde plane (61 V/m ; $T_{\text{ext}} = 28^\circ\text{C}$)

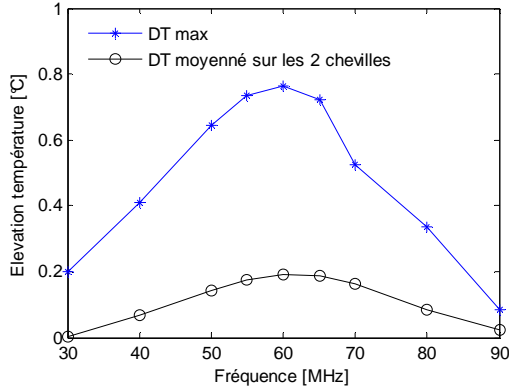


Figure 6 : Elévation de température ΔT max et ΔT moyenné dans les chevilles pour Duke hétérogène – Exposition onde plane (61 V/m ; $T_{\text{ext}} = 28^\circ\text{C}$)

Les valeurs de DAS 10g max induites par l'exposition sont comprises entre 1,5 et 5 W/kg alors que les valeurs de DAS moyennées sur les deux chevilles de Duke sont comprises entre 0,3 et 1,1 W/kg (Figure 5). Les élévations de température correspondantes sont comprises entre 0,1 et 0,8 $^\circ\text{C}$ pour le point de DAS 10g max et entre 0 et 0,2 $^\circ\text{C}$ sur les chevilles de Duke (Figure 6). Le rapport $(\text{DAS}/\Delta T)_{10g \text{ max}}$ est compris entre 6,5 et 22 $\text{W/kg}/^\circ\text{C}$ alors que $(\text{DAS}/\Delta T)_{\text{moyenné sur 2 chevilles}}$ est compris entre 5,5 et 16 $\text{W/kg}/^\circ\text{C}$ (sauf à 30 MHz où il est de 110 $\text{W/kg}/^\circ\text{C}$). De plus, le rapport $\text{DAS}_{\text{max}}/\text{DAS}_{\text{moyen}}$ varie entre 4,5 et 5,5 alors que le rapport $\Delta T_{\text{max}}/\Delta T_{\text{moyen}}$ varie entre 3 et 4,5 (sauf à 30 MHz, où il est de 77). Les

élévations fortes de température interviennent donc très localement pour ce genre d'exposition.

Nous avons observé l'élévation de température au point de DAS 10g max et avons comparé l'évolution thermique avec et sans exposition électromagnétique. Nous étudions cette évolution en température pour une exposition en onde plane à 61 V/m à la fréquence de résonance (60 MHz). Nous choisissons le point de DAS 10g max, car il présente les élévations de température les plus fortes. Pour cela, une première simulation est faite sans exposition durant 9000 s, soit 2 h 30 min. Lors de la deuxième simulation, le fantôme n'est exposé qu'entre les temps 3600 s et 7200 s. En effet, la 1^{ère} partie de cette simulation (entre 0 et 3600 s) permet de calculer l'état initial du fantôme et son adaptation à un environnement de 28°C , la 2^{ème} partie (3600 s à 7200 s) permet de calculer les élévations de température dues à l'exposition électromagnétique, car celle-ci n'intervient que pendant cette période. Enfin la 3^{ème} partie permet de calculer la réadaptation du fantôme à son environnement sans exposition. Les résultats à 60 MHz sont présentés en Figure 7.

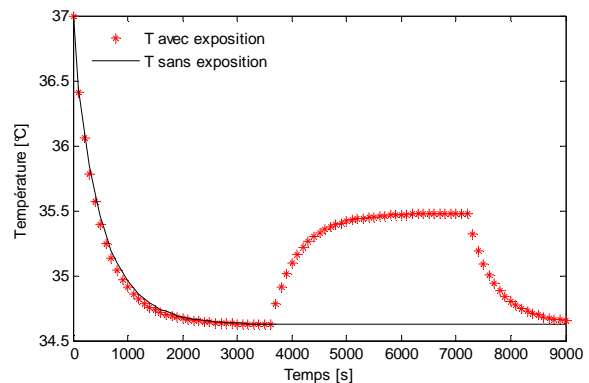


Figure 7 : Evolution de la température à 60 MHz au point de DAS 10g max pour Duke hétérogène – Exposition onde plane (61 V/m ; $T_{\text{ext}} = 28^\circ\text{C}$)

Nous constatons que sans exposition, entre 0 s et 3600 s, la température diminue. Cela s'explique par le fait que la température initiale de tous les tissus est fixée à 37°C , or notre point d'observation se situe à la surface du fantôme et la température extérieure est de 28°C , il y a donc une adaptation à l'air ambiant. Entre 3600 s et 7200 s, la température est stabilisée pour le cas sans exposition alors que pour le cas avec exposition, nous constatons une augmentation de température de $0,75^\circ\text{C}$. L'élévation intervient principalement dans les 20 premières minutes de l'exposition. Nous constatons que l'élévation se stabilise au bout de 30 min d'exposition. Cela s'explique par la thermorégulation du corps qui est prise en compte dans Sim4Life. Enfin quand l'exposition est terminée, donc à 7200 s, la température diminue à nouveau pour retrouver sa valeur initiale à 3600 s.

Ces résultats permettent de quantifier l'effet d'une exposition en onde plane à 61 V/m à la fréquence de résonance (60 MHz) et de constater que grâce à la thermorégulation du corps, l'augmentation maximale en un point est inférieure à $0,8^\circ\text{C}$.

b - Elévations de température sur tout le corps

Dans la littérature, les températures de l'œsophage, de l'hypothalamus ou du sang peuvent être considérées équivalentes à la température du corps [8] [10]. En effet, l'organe contrôlant la thermorégulation du corps est l'hypothalamus et c'est le sang qui propage cette régulation grâce à sa circulation dans le corps. Quant à l'œsophage, sa température est plus facilement mesurable *in vivo*. Nous avons donc étudié les températures moyennes du sang et de l'hypothalamus ainsi que les DAS_{CE} dans un fantôme hétérogène exposé à une onde plane en espace libre à 61 V/m entre 30 et 90 MHz. La température extérieure au fantôme est toujours fixée à 28 °C.

L'exposition induit des DAS_{CE} compris entre 0,08 W/kg et 0,32 W/kg, la valeur maximale étant atteinte à 65 MHz, fréquence de résonance du fantôme. A 65 MHz, l'élévation moyenne de température dans l'hypothalamus atteint 5 m°C avec une élévation locale maximale de 8 m°C. L'élévation moyenne de température dans le sang reste inférieure à 2 m°C alors que l'élévation locale maximale du sang est de 90 m°C à 60 MHz dans la cheville (Figure 8). Nous constatons que les élévations maximales moyennes dans ces deux tissus interviennent bien à 65 MHz, fréquence à laquelle le DAS_{CE} est maximal. De plus les variations en température de ces tissus suivent celles du DAS_{CE} .

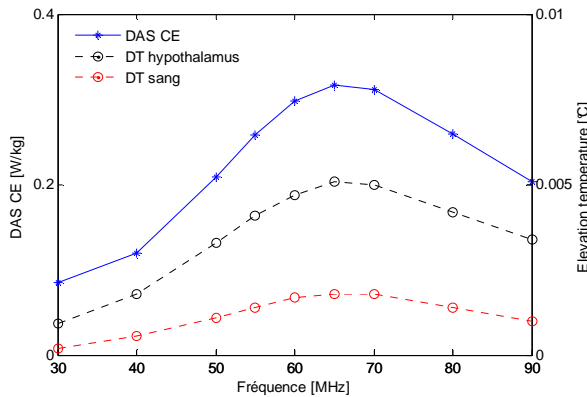


Figure 8 : DAS_{CE} et ΔT dans le sang et l'hypothalamus pour Duke hétérogène - Exposition onde plane (61 V/m ; $T_{ext} = 28$ °C)

Nous avons ensuite imposé un DAS_{CE} de 0,4 W/kg pour des expositions en onde plane à différentes fréquences : 2, 90 et 200 MHz afin de comparer les rapports $DAS_{CE}/\Delta T$ pour le sang et l'hypothalamus.

Table 1 : Caractéristiques électromagnétiques et thermiques de Duke pour une exposition onde plane à 2, 90 et 200 MHz polarisée verticalement avec un DAS_{CE} imposé à 0,4 W/kg

	DAS_{CE}	DAS_{10g} max	DAS_{10g} hypothalamus	ΔT max	ΔT hypothalamus	ΔT sang
2 MHz	0,403	17,089	0,215	2,917	0,008	0,002
90 MHz	0,408	3,666	0,165	0,130	0,007	0,002
200 MHz	0,402	6,058	0,683	0,988	0,032	0,002

Nous constatons que selon la fréquence, l'élévation de température locale est assez variable. Cela s'explique tout simplement par la répartition des DAS qui varie selon la fréquence. En effet pour des fréquences inférieures à 30 MHz, les DAS 10g restent localisés sur des petites sections du corps, notamment sur les chevilles. Quand la fréquence est proche de 100 MHz, les DAS 10g se répartissent de manière plus uniforme sur le corps alors qu'autour de 200 MHz, ils sont localisés au niveau du cou et de la tête. Nous constatons donc que pour un même DAS_{CE} , l'élévation moyenne en température de l'hypothalamus monte à 0,032 °C à 200 MHz, alors qu'elle est d'environ 0,008 °C à 2 et 90 MHz, tandis que celle du sang reste à 0,002 °C quelle que soit la fréquence (Table 1). Cette différence pour l'hypothalamus est due à la fréquence de résonance de la tête proche de 200 MHz qui concentre les DAS locaux. Alors que le sang est présent sur tout le corps, donc en prenant sa température moyenne, nous minimisons ces phénomènes locaux. Nous pouvons donc en conclure que la température du sang est plus appropriée que celle de l'hypothalamus pour l'évaluation de la température du corps entier lors d'une exposition électromagnétique.

Par ailleurs les valeurs de DAS 10g max peuvent fortement varier selon la fréquence d'exposition ainsi que les élévations de température correspondantes. Cela s'explique par la localisation de ces DAS 10g, car à 2 MHz ils interviennent à la cheville alors qu'à 200 MHz, ils interviennent au cou, cependant ces deux zones ne possèdent pas les mêmes tissus biologiques et ont donc un comportement thermique différent. Comme au niveau de la tête et du cou, il y a des organes vitaux, le corps fera plus d'effort pour maintenir une température constante dans cette zone que pour les membres. De plus à 2 MHz, l'exposition est plus localisée qu'à 200 MHz, où les DAS 10g se répartissent de façon plus homogène sur le corps.

IV. CONCLUSION

Nous avons montré que la modélisation des tissus en surface d'un fantôme hétérogène était importante sur les valeurs de DAS 10g, notamment pour les valeurs maximales qui apparaissent à la surface.

Le tissu équivalent proposé et utilisé pour homogénéiser les fantômes donnent des valeurs de DAS_{CE} satisfaisantes en comparaison d'un fantôme hétérogène ; et l'écart sur les valeurs de DAS 10g max est inférieur à 5 dB.

Cela permet d'envisager la création de fantômes semi-homogènes, où seuls les tissus en surface du fantôme seraient hétérogènes afin d'obtenir des valeurs de DAS 10g satisfaisantes tout en gardant le même DAS_{CE} qu'un fantôme hétérogène.

Nous avons constaté que l'élévation locale en température restait inférieure à 0,8 °C en se plaçant à la limite travailleur de l'ICNIRP pour des fréquences de 30 à 90 MHz. Enfin nous avons montré que la température moyenne du sang était plus appropriée que celle de l'hypothalamus pour estimer la température du corps lors d'une exposition. En effet ce tissu est présent sur tout le

corps, donc il est peu sensible aux phénomènes locaux de fort DAS.

REFERENCES

- [1] ICNIRP, “*Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*”, Health Phys., Vol. 74, 1998, pp. 494-522
- [2] IEEE, “*IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to Radio Frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz*”, IEEE Std C95.1, 2005
- [3] A. Christ, W. Kainz, E. Hahn, K. Honegger, M. Zefferer, E. Neufeld, W. Rascher, R. Janka, W. Bautz, J. Chen, B. Kiefer, P. Schmitt, H. Hollenbach, J. Shen, M. Oberle, D. Szczerba, A. Kam, J. Guag et N. Kuster, “*The Virtual Family – Development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations*”, Phys. Med. Bio., Vol. 55, 2010, pp. 23-38
- [4] “*The Visible Human Project*”, disponible en ligne <http://www.nlm.nih.gov/research/visible/>
- [5] C. Gabriel, “*Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies*”, Final Tech. Rep. Occupational and Environmental Health Directorat, 1996
- [6] IT’IS Foundation, “*Tissues properties database*”, disponible en ligne <http://www.itis.ethz.ch/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary/>
- [7] Pennes, “*Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm*”, Journal of applied physiology, Vol. 1, n° 12, pp. 93-122, 1948
- [8] A.Hirata, T. Asano et O. Fujiwara, “*FDTD analysis of human body-core temperature elevation due to RF far-field energy prescribed in the ICNIRP guidelines*”, Phys. Med. Biol., Vol. 52, 2007, pp. 5013-5023
- [9] A. Christ, T. Samaras, A. Klingeböck, N. Kuster, « *Characterization of the electromagnetic near-field absorption in layered tissue in the frequency range from 30 MHz to 6000 MHz* », Phys. Med. Bio., Vol. 51, 2006, pp. 4951-4965
- [10] E.R. Adair, S.A. Kellerher, G.W. Mack et T.S.Morocco, “*Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz*”, Bioelectromagnetics, Vol. 19, 1998, pp. 232-245